

PENGUNAAN FAKTOR DISTRIBUSI PERPINDAHAN DAYA NONLINIER DAN PERTIMBANGAN ALIRAN DAYA REAKTIF DALAM PERHITUNGAN ATC

Al Imran
Siti Saodah

Jurusan Teknik Elektro Universitas Negeri Makassar
Jurusan Teknik Elektro Institut Teknologi Nasional Bandung

ABSTRAK

Available Transfer Capability (ATC), yaitu kuantitas daya tambahan maksimum yang dapat ditransfer antara dua titik atau dua area pada jaringan sistem tenaga, perlu dihitung secara akurat untuk menjamin keandalan dan keamanan sistem bila transfer daya benar-benar dilakukan. Paper ini mempresentasikan suatu metode perhitungan ATC tanpa iterasi menggunakan faktor distribusi perpindahan daya nonlinier (nonlinear power transfer distribution factor atau PTDF nonlinier) dan mempertimbangkan aliran daya reaktif saluran. PTDF nonlinier digunakan untuk memperhitungkan perubahan besar dan sudut tegangan setiap bus akibat pembebanan pada keadaan awal dan perubahan beban selama transfer daya terjadi. Aliran daya reaktif diperhitungkan dalam menentukan batasan aliran daya aktif maksimum menggantikan rating MVA saluran. Metode sebelumnya menggunakan PTDF linier tanpa memperhitungkan aliran daya reaktif, kemudian dikembangkan lagi dengan tetap menggunakan PTDF linier tetapi memperhitungkan aliran daya reaktif. Sebagai acuan dalam menentukan galat, nilai ATC aktual juga dihitung dengan analisis aliran daya AC secara berulang (*sequential AC load flow*). Hasil simulasi menunjukkan bahwa metode perhitungan yang diusulkan memberikan hasil yang lebih baik (rata-rata galat paling kecil) daripada kedua metode sebelumnya.

Kata kunci: ATC, ATC aktual, PTDF linear, PTDF nonlinier

ABSTRACT

Available Transfer Capability (ATC), i.e. the quantity of maximum available power that can be transferred between two nodes or two areas in the power system network, should be calculated accurately to assure the reliability and security of power system if power transfer is really implemented. This paper presents a non iterative method of ATC calculations by using nonlinear power transfer distribution factor (nonlinear PTDF) and consider reactive power flows. Nonlinear PTDF is used to calculate the changes of voltage magnitude and angle as the effect of power system loading in base case condition and during the power transfer. Reactive power flows is incorporated in determining the limit of maximum active power flows to replace line MVA rating. The previous method used linear PTDF without incorporating reactive power flows, and then it's developed with considering reactive power flows but remained use PTDF linear. In this paper, the actual ATC values are also calculated with doing sequential AC load flow as the reference for computing error. The program simulation results indicate that the proposed calculation method is better than the two previous methods (have the least mean error).

Keywords: ATC, actual ATC, linear PTDF, nonlinear PTDF

PENDAHULUAN

Dalam sistem tenaga listrik yang terinterkoneksi satu sama lain, pertukaran energi atau transfer daya antar area atau antara dua titik pada sistem harus tetap memperhatikan batas-batas keamanan sistem tenaga. Karena itu perlu diketahui kuantitas daya tambahan maksimum yang dapat ditransfer, tanpa melanggar batas-batas keamanan tersebut (yaitu ATC).

Pertukaran energi atau transfer daya ini, tidak boleh melebihi nilai ATC-nya untuk menghindari resiko yang tidak semestinya terjadi seperti *overload*, keruntuhan tegangan (*voltage collapse*), atau *blackout*. Karena itu penentuan nilai ATC secara akurat yang mendekati nilai aktualnya merupakan suatu hal yang sangat penting dilakukan.

Metode perhitungan ATC dikembangkan dari penggunaan metode linier untuk menghitung perubahan aliran daya di saluran sebagai respons atas injeksi daya di bus, seperti yang dilakukan oleh Stott, B - J.L. Marinho (1979), Grainger-Stevenson (1994), dan Wood-Wollenberg (1996). Kemudian *North American Electric Reliability Council* (NERC) memperkenalkan metode perhitungan ATC secara linier dengan menggunakan *Linear Power Transfer Distribution Factor* (PTDF linier) atau Faktor Distribusi Perpindahan Daya linier pada tahun 1995 yang waktu itu diistilahkan dengan nama FCITC (*First Contingency Incremental Transfer Capability*), dan tahun 1996 dengan istilah *Available Transfer Capability* (ATC). Kemudian, Sauer, P.W. (1997) dan Dobson (2001), memperkenalkan beberapa isu-isu penting yang berkaitan dengan perhitungan ATC, seperti ketidakpastian kondisi sistem (*uncertainties*), yang kemudian melahirkan istilah *Transmission Reliability Margin* (TRM). Ini kemudian diperhatikan dalam perhitungan-perhitungan ATC selanjutnya.

Penggunaan metode-metode linier sebagai dasar dalam perhitungan ATC seperti yang telah disebutkan di atas memunculkan sejumlah kesalahan. Kesalahan-kesalahan ini secara garis besar dibagi dalam 3 kategori: a)

pengabaian sifat nonlinier aliran daya riil, b) pengabaian aliran daya reaktif, c) pengabaian level tegangan.

Untuk memperkecil kemungkinan kesalahan-kesalahan tadi, Grijalva, S. et. al. (1999 & 2003) melakukan perhitungan ATC yang merupakan penggabungan antara metode linier tradisional dan metode nonlinier penuh, yaitu dengan memperhitungkan dua sumber kesalahan yang disebutkan di atas. Aliran daya reaktif diperhitungkan dalam menentukan batasan termal saluran transmisi sedangkan perhitungan aliran daya untuk keadaan awal (*base case*) menggunakan metode nonlinier penuh, metode Newton-Raphson. Perhitungan dilakukan dengan menggunakan faktor distribusi perpindahan daya linier (PTDF linier). Namun pada perhitungan ATC yang dilakukan oleh Grijalva et al. pengaruh perubahan tegangan tiap bus sistem tenaga keadaan awal dan selama transfer daya terjadi diabaikan, yang merupakan asumsi dalam perhitungan ATC linier. Misalnya untuk transfer dari bus p ke bus q , perhitungan margin transfer untuk saluran $j-k$ dilakukan dengan menganggap bahwa $|V_j|$ dan $|V_k|$ konstan selama transfer daya berlangsung (atau $\frac{\partial |V_j|}{\partial P_q} = \frac{\partial |V_k|}{\partial P_q} = 0$).

Padahal kenyataannya $|V_j|$ dan $|V_k|$ mengalami perubahan kecil saat kondisi awal sistem dan selama transfer daya terjadi. Hal ini tentu mempunyai pengaruh pada keakuratan nilai ATC yang diperoleh.

Oleh karena itu, dalam penelitian ini diusulkan suatu metode perhitungan ATC, tetapi dengan memperhitungkan aliran daya reaktif dalam menentukan batasan termal saluran, dan aliran daya awal saluran dihitung dengan analisis aliran daya AC metode Newton-Raphson seperti metode Grijalva, tetapi metode yang diusulkan menggunakan faktor distribusi perpindahan daya nonlinier (PTDF nonlinier). Perubahan tegangan tiap bus sistem saat keadaan awal dan selama transfer daya terjadi diperhitungkan dalam penurunan persamaan PTDF nonlinier. Metode ini diharapkan dapat memberikan hasil yang lebih akurat



mendekati nilai ATC aktual.

Nilai ATC aktual dihitung dengan analisis aliran daya AC secara berulang (*sequential AC power flow*) untuk digunakan dalam menghitung besar galat yang dihasilkan oleh masing-masing metode terhadap nilai ATC aktual.

Perhitungan ATC Menggunakan Faktor Distribusi Perpindahan Daya

Faktor distribusi perpindahan daya atau *Power Transfer Distribution Factor (PTDF)* didefinisikan sebagai sensitivitas transfer daya dari bus pembangkit ke bus beban terhadap aliran daya saluran. Jika terjadi transfer daya dari bus p ke bus q sebesar $\Delta P_p (= -\Delta P_q)$, maka sensitivitas transfer daya tersebut terhadap perubahan aliran daya di saluran $j-k$ sistem adalah:

$$PTDF_{jk,pq} = \frac{\Delta P_{jk}}{\Delta P_p} \quad (1)$$

ΔP_{jk} adalah besar perubahan aliran daya di saluran $j-k$. Jumlah daya yang dapat ditransfer atau margin transfer dari bus p ke bus q dengan batasan saluran $j-k$ adalah:

$$\Delta P_p^{jk} = \frac{P_{jk}^{\max} - P_{jk}^o}{PTDF_{jk,pq}} \quad \text{untuk} \quad PTDF_{jk,pq} > 0$$

atau

$$\Delta P_p^{jk} = \frac{-P_{jk}^{\max} - P_{jk}^o}{PTDF_{jk,pq}} \quad \text{untuk} \quad PTDF_{jk,pq} < 0$$

P_{jk}^{\max} adalah batasan aliran daya aktif maksimum yang mengalir di saluran $j-k$. P_{jk}^o adalah daya yang mengalir di saluran $j-k$ keadaan awal. Sedangkan nilai ATC untuk arah transfer tersebut adalah:

$$ATC_{p \rightarrow q} = \min \{ \Delta P_p^{jk} \} \text{ dari semua sal. } J \quad (3)$$

Perhitungan ATC ini dengan menganggap bahwa daya transfer yang terjadwal tetap (*base scheduled transfers*) tidak ada, dan TRM (*Transmission Reliability Margin*) diperhitungkan di akhir perhitungan sebesar 8% (Grijalva, 1999).

Perhitungan ATC Menggunakan PTDF Linier

Perhitungan ATC menggunakan PTDF

linier disebut dengan *perhitungan ATC metode linier*. Nilai faktor distribusi linier dihitung dengan persamaan:

$$PTDF_{jk,pq} = \frac{\Delta P_{jk}}{\Delta P_p} = \frac{\{(X_{jp} - X_{jq}) - (X_{kp} - X_{kq})\}}{x_{jk}} \quad (4)$$

X_{jp} , X_{jq} , X_{kp} , dan X_{kq} adalah komponen matriks impedansi bus (Z_{Bus}) dari sistem. Saluran direpresentasikan hanya dengan reaktansi serinya, dan x_{jk} adalah reaktansi primitif saluran antara bus j dengan bus k .

Dalam perhitungan ATC metode linier, P_{jk}^{\max} pada Persamaan (2) dianggap sama dengan rating MVA saluran, S_{jk}^{\max} . Penentuan keadaan awal sistem untuk mengetahui aliran daya setiap saluran $j-k$ P_{jk}^o , dilakukan dengan analisis aliran daya DC (*DC load flow*). Metode ini seperti yang dilakukan oleh NERC (1995 & 1996).

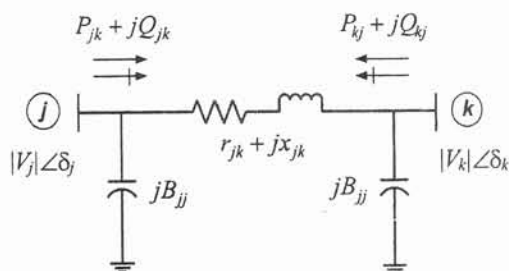
Aliran Daya Kompleks Maksimum Saluran dan Hubungannya pada Diagram Lingkaran Daya

Misalkan sebuah saluran transmisi dengan model- π diperlihatkan dalam Gambar 1. Daya kompleks yang mengalir dari bus j ke bus k adalah:

$$S_{jk} = P_{jk} + jQ_{jk} = |V_j|^2 G_{jk} - |V_j V_k Y_{jk}| \cos(\theta_j - \theta_k - \alpha_{jk}) + j \{ -|V_j|^2 B_{jj} - |V_j|^2 B_{jk} - |V_j V_k Y_{jk}| \sin(\theta_j - \theta_k - \alpha_{jk}) \} \quad (5)$$

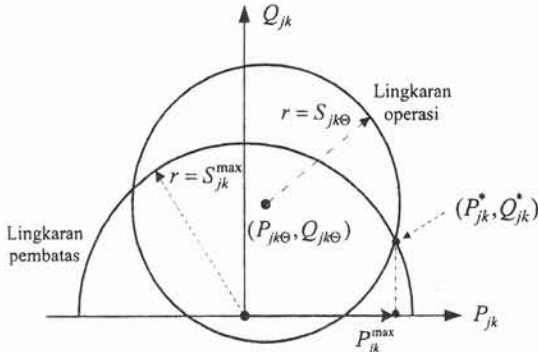
$|V_j|$, $|V_k|$, dan θ_j , θ_k masing-masing adalah magnitude dan sudut tegangan bus j dan k . Sedangkan $|Y_{jk}|$ dan α_{jk} adalah magnitude dan sudut dari admitansi:

$$G_{jk} + jB_{jk} = 1/(r_{jk} + jx_{jk}) \quad (6)$$



Gambar 1 Representasi Saluran Transmisi dengan Model- π

Hubungan antara daya aktif dan daya reaktif yang mengalir di saluran jika terjadi transfer daya dalam sistem dapat diperoleh dari Persamaan (5) dan dilukiskan dalam Gambar 2.



Gambar 2 Lingkaran Operasi dan Lingkaran Pembatas Saluran Transmisi pada Bidang $P_{jk} - Q_{jk}$

Aliran daya kompleks maksimum dibatasi oleh lingkaran operasi dan bagian dalam lingkaran pembatas. Karena itu dapat dilihat bahwa aliran daya kompleks maksimum (*maximum complex flow*) saluran $j-k$ ada di titik (P_{jk}^*, Q_{jk}^*) pada Gambar 2.

Nilai-nilai P_{jk}^* dan Q_{jk}^* dapat diperoleh dengan menyelesaikan sistem persamaan-persamaan lingkaran operasi dan lingkaran pembatas berikut:

$$(P_{jk} - P_{jk\Theta})^2 + (Q_{jk} - Q_{jk\Theta})^2 = S_{jk\Theta}^2 \quad (7)$$

$$P_{jk}^2 + Q_{jk}^2 = (S_{jk}^{\max})^2 \quad (8)$$

Dengan memperkurangkan Persamaan (7) oleh Persamaan (8), diperoleh:

$$\begin{aligned} (P_{jk\Theta}^2 + Q_{jk\Theta}^2) P_{jk}^{*2} - P_{jk\Theta} \left\{ (S_{jk}^{\max})^2 - M^2 \right\} P_{jk}^* \\ + \frac{1}{4} \left\{ (S_{jk}^{\max})^2 - M^2 \right\}^2 - Q_{jk\Theta}^2 (S_{jk}^{\max})^2 = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

dengan:

$$M^2 = S_{jk\Theta}^2 - P_{jk\Theta}^2 - Q_{jk\Theta}^2 \quad (10)$$

$$(P_{jk\Theta}, Q_{jk\Theta}) = (|V_j|^2 G_{jk}, -|V_j|^2 B_{jj} - |V_j|^2 B_{jk}) \quad (11)$$

$$S_{jk\Theta} = |V_j V_k Y_{jk}| \quad (12)$$

Persamaan (9) merupakan persamaan kuadrat dengan koefisien-koefisien konstanta sebagai berikut:

$$\begin{aligned} a &= (P_{jk\Theta}^2 + Q_{jk\Theta}^2) \\ b &= -P_{jk\Theta} \left\{ (S_{jk}^{\max})^2 - M^2 \right\} \\ c &= \frac{1}{4} \left\{ (S_{jk}^{\max})^2 - M^2 \right\}^2 - Q_{jk\Theta}^2 (S_{jk}^{\max})^2 \end{aligned} \quad (13)$$

Dengan demikian, solusi Persamaan (9) untuk aliran daya kompleks maksimum adalah:

$$P_{jk}^* = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}; \quad Q_{jk}^* = \sqrt{(S_{jk}^{\max})^2 - P_{jk}^{*2}} \quad (14)$$

P_{jk}^* menyatakan pendekatan yang lebih baik dari daya aktif maksimum yang mengalir di saluran $j-k$ yang disebabkan oleh transfer daya dengan mempertimbangkan komponen daya reaktif.

Perhitungan ATC Menggunakan PTDF Linier dan Memperhitungkan Aliran daya Reaktif

Metode perhitungan ATC menggunakan PTDF linier dan memperhitungkan aliran daya reaktif disingkat *perhitungan ATC metode linier reaktif*. Metode ini dilakukan oleh Grijalva et. al. (1999 & 2003). Dalam metode ini, batasan aliran daya aktif maksimum di saluran $j-k$: P_{jk}^{\max} dalam Persamaan (2), ditentukan dengan menggunakan Persamaan (14), yaitu sama dengan P_{jk}^* . Sedangkan dalam perhitungan ATC linier tanpa memperhitungkan aliran daya reaktif, P_{jk}^{\max} langsung diasumsikan sama dengan rating MVA saluran, S_{jk}^{\max} .

Dalam perhitungan ATC metode linier reaktif, aliran daya saluran saat keadaan awal P_{jk}^0 , dihitung dengan analisis aliran daya AC (*AC load flow*) yaitu dengan metode Newton-Raphson, sedangkan dalam metode sebelumnya dihitung dengan analisis aliran daya DC. Dalam metode ini tetap menggunakan PTDF linier, yang dihitung dengan Persamaan (4). Selanjutnya nilai ATC linier reaktif dihitung dengan Persamaan (2) dan (3). Solusi untuk dari Persamaan (14)



mempunyai dua nilai, dipilih nilai positif, jika PTDF saluran $j-k$ positif dan sebaliknya untuk PTDF saluran $j-k$ yang bernilai negatif.

METODOLOGI YANG DIUSULKAN

Metode perhitungan ATC ini selanjutnya disingkat *metode nonlinier reaktif* yang merupakan metode perhitungan yang diusulkan dalam penelitian ini. Seperti dengan metode sebelumnya, perhitungan ATC dalam metode ini juga memperhitungkan aliran daya reaktif dalam mencari batasan aliran daya aktif maksimum di saluran $j-k$, P_{jk}^{\max} . Aliran daya aktif saluran $j-k$ saat keadaan awal, P_{jk}^0 , juga dihitung dengan analisis aliran daya AC. Perbedaannya, metode ini menggunakan PTDF nonlinier.

Persamaan numerik perhitungan PTDF nonlinier dapat dengan mudah disisipkan dalam program perhitungan ATC yang sudah ada, dan tidak terlalu membutuhkan banyak penambahan algoritma matematis karena tinggal mengambil nilai matriks Jacobian yang sudah dihitung sebelumnya saat analisis aliran daya AC. Tambahan algoritma matematis hanya diperlukan dalam perhitungan diferensial persamaan aliran daya saluran terhadap perubahan besar dan sudut tegangan bus ujung-ujung saluran yang ditinjau. Sehingga demikian dengan hanya menambahkan sedikit persamaan numerik, diharapkan metode ini memberikan hasil yang lebih akurat dan lebih dekat dengan nilai ATC aktual.

Faktor Distribusi Perpindahan Daya Nonlinier (PTDF Nonlinier)

Penurunan persamaan PTDF nonlinier akan melihat perubahan aliran daya di saluran akibat transfer daya dari bus pembangkit ke bus beban dengan memperhitungkan perubahan besar dan sudut tegangan setiap bus pada sistem.

Hubungan perubahan besar dan sudut tegangan setiap bus i terhadap perubahan aliran daya di saluran $j-k$ akibat transfer daya dari bus p ke bus q sebesar ΔP_p dapat ditulis sebagai:

$$\Delta P_{jk} = \left[\frac{\partial P_{jk}}{\partial \theta_i} \quad \frac{\partial P_{jk}}{\partial |V_i|} \right] \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta_i \\ \Delta |V_i| \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\text{dan} \quad \begin{bmatrix} \Delta \theta_i \\ \Delta |V_i| \end{bmatrix} = \left[\frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} \quad \frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} \right]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} \quad (16)$$

$i = 2, 3, \dots, j, k, \dots, p, \dots, q, \dots, n$; n = jumlah bus dan bus 1 adalah bus tadah (*slack*).

$$\frac{\partial P_{jk}}{\partial \theta_i} = \frac{\partial P_{jk}}{\partial \theta_2} \dots \frac{\partial P_{jk}}{\partial \theta_j} \frac{\partial P_{jk}}{\partial \theta_k} \dots \frac{\partial P_{jk}}{\partial \theta_p} \dots \frac{\partial P_{jk}}{\partial \theta_q} \dots \frac{\partial P_{jk}}{\partial \theta_n} \quad (17)$$

$$\frac{\partial P_{jk}}{\partial |V_i|} = \frac{\partial P_{jk}}{\partial |V_2|} \dots \frac{\partial P_{jk}}{\partial |V_j|} \frac{\partial P_{jk}}{\partial |V_k|} \dots \frac{\partial P_{jk}}{\partial |V_p|} \dots \frac{\partial P_{jk}}{\partial |V_q|} \dots \frac{\partial P_{jk}}{\partial |V_n|} \quad (18)$$

$$\Delta \theta_i = \Delta \theta_2 \dots \Delta \theta_j \Delta \theta_k \dots \Delta \theta_p \dots \Delta \theta_q \dots \Delta \theta_n \quad (19)$$

$$\Delta |V_i| = \Delta |V_2| \dots \Delta |V_j| \Delta |V_k| \dots \Delta |V_p| \dots \Delta |V_q| \dots \Delta |V_n| \quad (20)$$

$$\text{matriks} \quad \begin{bmatrix} \frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} \\ \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} & \frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \quad (21)$$

adalah matriks Jacobian yang dapat diperoleh dari analisis aliran daya AC.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \vdots \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P_2 = 0 \\ M \\ \Delta P_j = 0 \\ \Delta P_k = 0 \\ M \\ \Delta P_p = +\Delta P_p \\ M \\ \Delta P_q = -\Delta P_p \\ M \\ \Delta P_n = 0 \\ \vdots \\ \Delta Q_2 = 0 \\ M \\ \Delta Q_j = 0 \\ \Delta Q_k = 0 \\ M \\ \Delta Q_p = 0 \\ M \\ \Delta Q_q = 0 \\ M \\ \Delta Q_n = 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ M \\ 0 \\ 0 \\ M \\ +1 \\ -1 \\ M \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ M \\ 0 \\ 0 \\ M \\ 0 \\ M \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \Delta P_p \quad (22)$$

Persamaan untuk aliran daya di saluran $j-k$, P_{jk} telah ditunjukkan pada Persamaan (5) dan ditulis kembali sebagai:

$$P_{jk} = |V_j|^2 G_{jk} - |V_j V_k Y_{jk}| \cos(\theta_j - \theta_k - \alpha_{jk}) \quad (23)$$

Turunan parsial P_{jk} terhadap V_i dan θ_i , yaitu $\frac{\partial P_{jk}}{\partial \theta_i}$ dan $\frac{\partial P_{jk}}{\partial |V_i|}$ di setiap bus i dalam Persamaan (17) dan (18) akan bernilai nol, kecuali pada $i = j$ dan $i = k$, yaitu:

$$\frac{\partial P_{jk}}{\partial |V_j|} = 2|V_j|G_{jk} - |V_k| [G_{jk} \cos(\theta_j - \theta_k)] + B_{jk} \sin(\theta_j - \theta_k) \quad (24)$$

$$\frac{\partial P_{jk}}{\partial |V_k|} = -|V_j| [G_{jk} \cos(\theta_j - \theta_k) + B_{jk} \sin(\theta_j - \theta_k)] \quad (25)$$

$$\frac{\partial P_{jk}}{\partial \theta_j} = |V_j|V_k [G_{jk} \sin(\theta_j - \theta_k) - B_{jk} \cos(\theta_j - \theta_k)] \quad (26)$$

$$\frac{\partial P_{jk}}{\partial \theta_k} = -|V_j|V_k [G_{jk} \sin(\theta_j - \theta_k) - B_{jk} \cos(\theta_j - \theta_k)] \quad (27)$$

Bila invers matrik jacobian Persamaan (21) adalah:

$$[J]^{-1} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} J'_{(1)} & J'_{(2)} \\ J'_{(3)} & J'_{(4)} \end{bmatrix} \quad (28)$$

Dengan menguraikan komponen-komponen Persamaan (28), kemudian bersama-sama dengan Persamaan (22) disubstitusikan ke dalam Persamaan (16), diperoleh:

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta_2 \\ M \\ \Delta \theta_j \\ \Delta \theta_k \\ M \\ \Delta \theta_p \\ M \\ \Delta \theta_q \\ M \\ \Delta \theta_n \\ \Delta |V_i| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J'_{(1)2p} - J'_{(1)2q} \\ M \\ J'_{(1)jp} - J'_{(1)jq} \\ J'_{(1)kp} - J'_{(1)kq} \\ M \\ J'_{(1)pp} - J'_{(1)pq} \\ M \\ J'_{(1)qp} - J'_{(1)qq} \\ M \\ J'_{(1)np} - J'_{(1)nq} \\ \Delta |V_2| \\ M \\ \Delta |V_j| \\ \Delta |V_k| \\ M \\ \Delta |V_p| \\ M \\ \Delta |V_q| \\ M \\ \Delta |V_n| \end{bmatrix} \Delta P_p \quad (29)$$

Kemudian, substitusi Persamaan (29) ke dalam Persamaan (15) menghasilkan:

$$\Delta P_{jk} = \left\{ \frac{\partial P_{jk}}{\partial \theta_j} (J'_{(1)jp} - J'_{(1)jq}) + \frac{\partial P_{jk}}{\partial \theta_k} (J'_{(1)kp} - J'_{(1)kq}) + \frac{\partial P_{jk}}{\partial |V_j|} (J'_{(3)jp} - J'_{(3)jq}) + \frac{\partial P_{jk}}{\partial |V_k|} (J'_{(3)kp} - J'_{(3)kq}) \right\} \Delta P_p \quad (30)$$

$J'_{(1)jp}$, $J'_{(1)jq}$, $J'_{(1)kp}$, dan $J'_{(1)kq}$ adalah komponen-komponen I dan $J'_{(3)jp}$, $J'_{(3)jq}$, $J'_{(3)kp}$, dan $J'_{(3)kq}$ adalah komponen-komponen III dari invers matriks jacobian Persamaan (28).

Dengan demikian PTDF nonlinier untuk transfer daya dari bus p ke bus q di saluran $j - k$ didefinisikan sebagai:

$$PTDF_{jk,pq} = \frac{\Delta P_{jk}}{\Delta P_p} = \left\{ \frac{\partial P_{jk}}{\partial \theta_j} (J'_{(1)jp} - J'_{(1)jq}) + \frac{\partial P_{jk}}{\partial \theta_k} (J'_{(1)kp} - J'_{(1)kq}) + \frac{\partial P_{jk}}{\partial |V_j|} (J'_{(3)jp} - J'_{(3)jq}) + \frac{\partial P_{jk}}{\partial |V_k|} (J'_{(3)kp} - J'_{(3)kq}) \right\} \quad (31)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Metode perhitungan ATC yang diusulkan dibuat dengan bahasa pemrograman MATLAB dan diterapkan di 3 sistem tenaga, yaitu Sistem I (Sistem 5 bus 7 saluran), Sistem II (Sistem 30 bus IEEE 40 saluran) dan Sistem III (sistem 57 bus IEEE 80 saluran). Data untuk Sistem II dan Sistem III dapat dilihat pada Pai (1984), sedang data Sistem I dan diagram satu garis untuk ketiga sistem ditampilkan dalam Lampiran. Perbandingan nilai ATC yang diperoleh dari keempat metode yang dilakukan, yang diterapkan untuk Sistem I diperlihatkan pada Tabel 1.

Tabel 1 Hasil Perhitungan *ATC* Metode Linier, Linier Reaktif, Nonlinier Reaktif dan Aktual untuk Sistem I

Arah Transfer	Metode perhitungan <i>ATC</i>			
	Linier (pu)	Linier Reaktif (pu)	Nonlinier Reaktif (pu)	Aktual (pu)
1 - 3	1,4623	1,4264	1,4053	1,3916
1 - 4	1,3699	1,3363	1,3086	1,3130
1 - 5	0,8023	0,7968	0,7885	0,7871
2 - 3	1,2784	1,2619	1,2567	1,2144
2 - 4	1,2047	1,1923	1,1903	1,1776
2 - 5	0,7606	0,7553	0,7473	0,7176

Untuk menghemat tempat, hasil perhitungan nilai *ATC* Sistem II dan Sistem III tidak ditampilkan. Perbandingan besar galat hasil perhitungan *ATC* dari ketiga metode terhadap nilai *ATC* aktual yang diterapkan terhadap ketiga sistem tenaga diperlihatkan dalam Tabel 2, 3, dan 4.

Tabel 2 Prosentase Galat *ATC* Linier, *ATC* Linier Reaktif, dan *ATC* Nonlinier Reaktif terhadap Nilai *ATC* Aktual Sistem I

No.	Arah Transfer	Galat Linier (%)	Galat Linier Reaktif (%)	Galat Nonlinier Reaktif (%)
1	1 - 3	5,08	2,50	0,98
2	1 - 4	4,33	1,77	-0,34
3	1 - 5	1,93	1,23	0,18
4	2 - 3	5,27	3,91	3,48
5	2 - 4	2,30	1,25	1,08
6	2 - 5	5,99	5,25	4,14
Rata-rata		4,15	2,65	1,59

Tabel 3 Prosentase Galat *ATC* Linier, *ATC* Linier Reaktif, dan *ATC* Nonlinier Reaktif terhadap Nilai *ATC* Aktual Sistem II

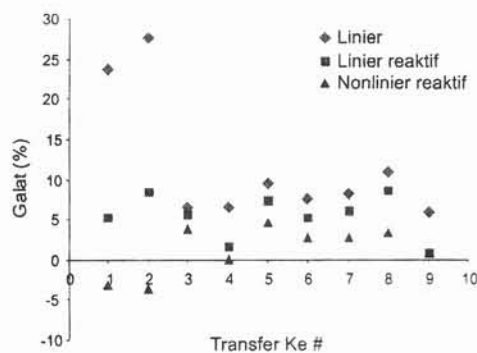
No.	Arah Transfer	Galat Linier (%)	Galat Linier Reaktif (%)	Galat Nonlinier Reaktif (%)
1	1 - 4	12,30	9,41	4,67
2	1 - 15	9,16	4,88	0,38
3	1 - 23	13,56	9,10	4,02
4	2 - 7	9,05	2,59	1,50
5	2 - 14	11,70	7,31	2,13
6	2 - 16	9,76	5,45	2,23
Rata-rata		10,92	6,46	2,49

Tabel 4 Prosentase Galat *ATC* Linier, *ATC* Linier Reaktif, dan *ATC* Nonlinier Reaktif terhadap Nilai *ATC* Aktual Sistem III

No.	Arah Transfer	Galat Linier (%)	Galat Linier Reaktif (%)	Galat Nonlinier Reaktif (%)
1	1 - 13	23,68	5,14	-3,27
2	1 - 23	27,61	8,51	-3,69
3	3 - 17	6,54	5,56	3,83
4	3 - 29	6,61	1,58	-0,11
5	8 - 38	9,56	7,27	4,51
6	8 - 44	7,50	5,24	2,66
7	8 - 50	8,28	6,00	2,67
8	8 - 55	10,98	8,67	3,26
9	12 - 5	5,84	0,84	0,74
Rata-rata		11,84	5,42	2,75

Dari Tabel 2, 3, dan 4 terlihat bahwa ketiga sistem tenaga, perhitungan *ATC* metode nonlinier reaktif memberikan prosentase galat terhadap nilai *ATC* aktual paling kecil apabila dibandingkan kedua metode sebelumnya, dan ini sesuai dengan yang diharapkan. Gambar 4 mengilustrasikan perbandingan galat pada sistem III.

Disamping memberikan hasil perhitungan yang lebih akurat, beberapa hal yang menguntungkan dalam perhitungan *ATC* metode nonlinier reaktif. Pertama, untuk suatu keadaan awal, perhitungan batasan aliran daya aktif maksimum P_{jk}^{max} dilakukan hanya sekali dan dapat digunakan untuk berbagai arah transfer yang berbeda. Kedua, pada perhitungan *PTDF* nonlinier, nilai matriks jacobian tidak perlu dihitung lagi, hanya langsung diambil dari perhitungan aliran daya AC pada keadaan awal, sehingga tidak terlalu memerlukan tambahan algoritma perhitungan. Ketiga, penentuan invers matriks jacobian dalam perhitungan *PTDF* nonlinier, dilakukan dengan metode implisit invers dengan teknik matriks jarang dan faktorisasi LU (*LU factorization*), sehingga dapat mempercepat proses perhitungan dan menghemat memori komputer untuk penerapan terhadap sistem yang berukuran besar.



Gambar 4 Perbandingan Galat ATC Linier, ATC Linier Reaktif, dan ATC Nonlinier Reaktif terhadap Nilai ATC Aktual pada Sistem III

KESIMPULAN DAN SARAN

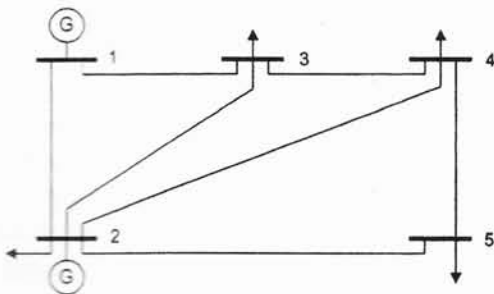
Perhitungan yang dilakukan dengan 21 arah transfer terhadap tiga sistem tenaga yang berbeda, yaitu Sistem I (sistem 5 bus 7 saluran), Sistem II (sistem 30 bus IEEE 41 saluran), dan Sistem III (sistem 57 bus IEEE 80 saluran), diperoleh rata-rata galat linier sebesar 8,97%, rata-rata galat linier dengan reaktif sebesar 4,84%, dan rata-rata galat nonlinier dengan reaktif sebesar 2,31%. Dengan demikian metode perhitungan ATC yang diusulkan, yaitu metode nonlinier reaktif atau metode perhitungan ATC menggunakan faktor distribusi perpindahan daya nonlinier (PTDF nonlinier) dan memperhitungkan aliran daya reaktif, merupakan metode perhitungan yang lebih baik bila dibandingkan dengan kedua metode sebelumnya, karena menghasilkan rata-rata galat paling kecil dan nilai ATC yang lebih mendekati nilai aktual.

Metode perhitungan ATC ini dapat digunakan dalam sistem kompetisi tenaga listrik dalam melakukan transaksi daya. Dengan nilai ATC yang lebih akurat yang dihasilkan dari metode ini, keamanan dan keandalan sistem lebih terjamin dalam melakukan transfer daya, sehingga pihak pengguna dan penyedia tenaga listrik merasa aman dalam melakukan transaksi daya sesuai kebutuhannya.

DAFTAR PUSTAKA

- Dobson, I. et al. 2001. *Electric Power Transfer Capability: Concepts, Applications, Sensitivity and Uncertainty*. Power Systems Engineering Research Center. New York
- Grainger, J.J. & Stevenson, W.D. 1994. *Power System Analysis*. McGraw-Hill. Singapore
- Grijalva, S. et al. 2003. Enhancement of Linear ATC Calculations by the Incorporation of Reactive Power Flows" *IEEE Transactions on Power System* Vol.18 no.2 hal.619-624
- Grijalva, S. & Sauer, P.S. 1999. Reactive Power Considerations in Linear ATC Computation. *Proceedings of the 32nd Hawaii International Conference on System Sciences*
- NERC Transmission Transfer Capability Task Force. 1995. *Transmission Transfer Capability*. North American Electric Reliability Council
- NERC Transmission Transfer Capability Task Force. 1996. *Available Transfer Capability, Definition and Determination*. North American Electric Reliability Council
- Pai, M.A. 1984. *Computer Techniques in Power System Analysis*. Tata McGraw-Hill. New Delhi
- Sauer, P.W. 1997. Technical Challenges of Computing Available Transfer Capability in Electric Power Systems", *Proceedings of the 30th Annual Hawaii International Conference on System Sciences* Vol.5 Hawaii. hal.589-593
- Stott, B. & Marinho, J.L. 1979. Linear Programming for Power System Network Security Applications. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. Vol.PAS-98 No.3. hal.837-848
- Wood, A.J. & Wollenberg, B.F. 1996. *Power Generation, Operation, and Control*. John Wiley & Sons. New York

LAMPIRAN



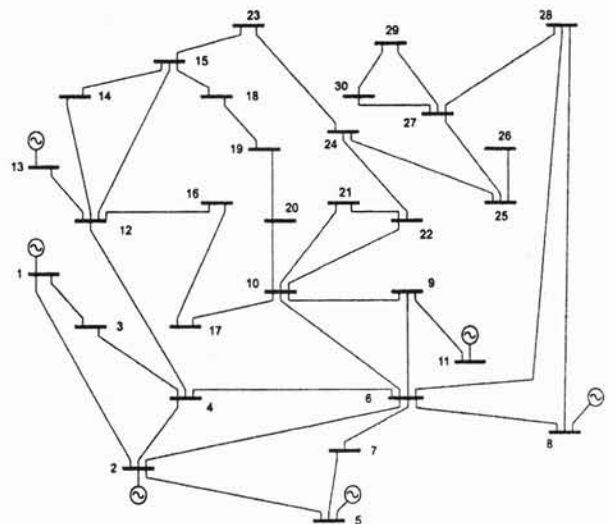
Gambar A.1 Diagram Segaris Sistem 5 Bus 7 Saluran (Sistem I)

Tabel A.1 Data Pembangkitan dan Beban Sistem 5 Bus 7 Saluran

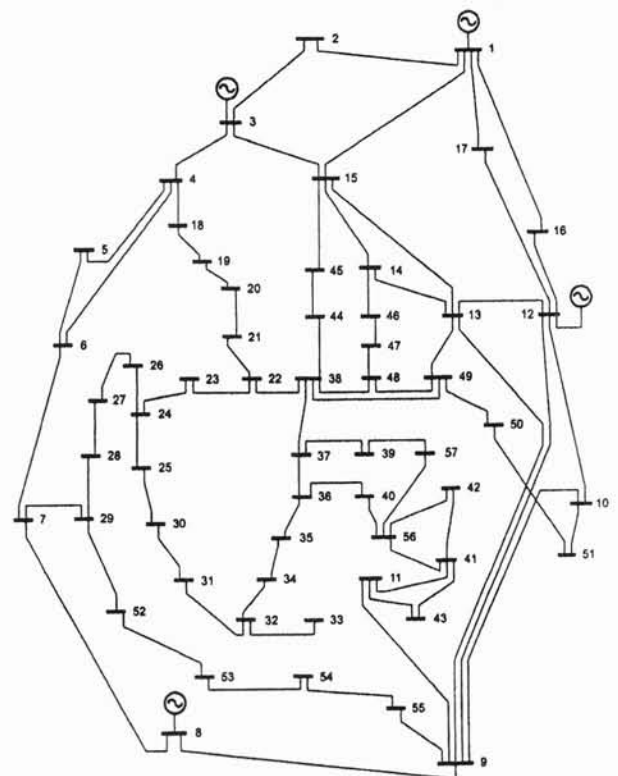
Bus- <i>i</i>	Pembangkitan		Beban	
	P_g (MW)	Q_g (MVAR)	P_d (MW)	Q_d (MVAR)
1	0	0	0	0
2	40	30	20	10
3	0	0	45	15
4	0	0	40	5
5	0	0	60	10

Tabel A.2 Data Saluran Sistem 5 Bus 7 Saluran

Saluran		R_{jk} (pu)	X_{jk} (pu)	B_{jl} (pu)	S_{jk}^{max} (pu)
<i>j</i>	<i>k</i>				
1	2	0,02	0,08	0,030	1,8
1	3	0,01	0,25	0,070	1,3
2	3	0,02	0,20	0,040	0,7
2	4	0,02	0,20	0,030	0,7
2	5	0,02	0,10	0,015	1,2
3	4	0,01	0,03	0,010	1,2
4	5	0,05	0,24	0,025	1,0



Gambar A.2 Diagram Satu Garis Sistem 30 Bus IEEE 41 Saluran (Sistem II)



Gambar A.3 Diagram Satu Garis Sistem 57 Bus IEEE 80 Saluran (Sistem III)